

## КАРБИДНЫЕ ФАЗЫ В МЕТЕОРИТАХ

Брусницына Е.В., Муфтахетдинова Р.Ф., Яковлев Г.А., Гроховский В.И.

ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, [jeka\\_bru@list.ru](mailto:jeka_bru@list.ru)

Углерод в метеоритах и других внеземных материалах присутствует в металлических частицах Fe-Ni в виде графита, ударно-образованных углеродных полиморфов и карбидов железа: когенита  $(\text{Fe}, \text{Ni})_3\text{C}$  и хаксонита  $(\text{Fe}, \text{Ni})_{23}\text{C}_6$ . [Scott, 1971; Buchwald, 1975]. И хотя большинство работ по изучению углерода посвящено графитовым компонентам и алмазам, исследование карбидов железа в метеоритах представляет особый интерес, поскольку когенит крайне редко встречается в земных породах, а хаксонит не встречается вовсе.

Впервые эти два минерала были обнаружены именно в метеоритах. Когенит был открыт Э. Вайншенком в 1889 г. в железном метеорите Magura и назван в честь немецкого минералога Эмиля Вильгельма Когена. Когенит встречается в земном самородном железе в вулканических породах. Также данный карбид  $(\text{Fe}, \text{Ni})_3\text{C}$  известен как цементит, который образуется в искусственных сплавах системы Fe – C. Когенит имеет ромбическую решетку с параметрами ячейки  $a = 4.518 \text{ \AA}$ ,  $b = 5.069 \text{ \AA}$ ,  $c = 6.736 \text{ \AA}$ ,  $Z = 4$ . В метеоритах когенит встречается в ассоциации с железом, шрейберзитом, троилитом и вюститом. Химический состав когенита в метеорите Magura следующий: Fe – 89.8%, Co – 0.7%, Ni – 3.1%, C – 6.4% [Handbook of Mineralogy, cohenite].

Минерал хаксонит был открыт в 1971 г. британским ученым Эдвардом Скоттом в железных метеоритах Toluca и Canyon Diablo [Scott, 1971] и назван в честь Ховарда Аксона (H. J. Axon), металловеда, исследователя внеземного вещества из Манчестерского Университета. По своим структурным параметрам хаксонит схож с карбидом хрома  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ . Карбид железа  $(\text{Fe}, \text{Ni})_{23}\text{C}_6$  имеет кубическую решетку  $a = 10.55 \text{ \AA}$ ,  $Z = 4$ , аналогичную карбиду хрома  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  ( $a = 10.65(5) \text{ \AA}$ ,  $Z = 4$ ) и марганца  $\text{Mn}_{23}\text{C}_6$  ( $a = 10.56 \text{ \AA}$ ,  $Z = 4$ ). В метеоритах хаксонит встречается вблизи частиц камасита  $\alpha\text{-Fe}(\text{Ni})$ , тэнита  $\gamma\text{-Fe}(\text{Ni})$ , шрейберзита  $(\text{Fe}, \text{Ni})_3\text{P}$ , когенита  $\text{Fe}_3\text{C}$ , пентландита  $(\text{Fe}, \text{Ni})_9\text{S}_8$  и магнетита. Химический состав хаксонита: Fe – 89.5%, Co – 0.18%, Ni – 4.91%, C – 5.4% [Handbook of Mineralogy, haxonite].

Хаксонит отличается от когенита тем, что имеет кубическую структуру и является изотропным в отраженном свете, тогда как когенит является ромбическим и более анизотропным.

Анализ базы данных минералов [mindat.org] показывает, что хаксонит был обнаружен в 24 различ-

ных метеоритах. Преимущественно это железные метеориты типа IAB (16 находок), также встречается в железных метеоритах типа IIIЕ и IIAB. Помимо этого карбид железа  $(\text{Fe}, \text{Ni})_{23}\text{C}_6$  был найден в углистом (C03.0) и обыкновенном (LL3) хондритах. Кроме того, он обнаружен в веществе, доставленном с астероида Итокава [Harries, 2014]. Когенит в метеоритах встречается в два раза чаще – 62 находки, из них 22 приходится на тип IAB и 11 – на IIAB, по одной находке имеется в других типах железных метеоритах (IIAB, IIIЕ, IIC, IVA, ungrouped). Также когенит встречается в энстатитовых, углистых и обыкновенных хондритах, в одном палласите и в нескольких уреилитах.

В настоящей работе исследовалась структура двух разновидностей карбидов железа (когенит и хаксонит) в метеоритах Odessa (IAB-MG) и Уакит (IIAB), а также во фрагменте обыкновенного хондрита Челябинск (LL5) со светлой литологией. Идентификация этих фаз проводилась с помощью оптического микроскопа Axiovert 40 MAT и электронного – FE-SEM ΣIGMA VP с использованием приставок EDS и EBSD. Образцы были подготовлены для оптической и электронной микроскопии, используя стандартные металлографические методики. Травление проводилось 2%-ным раствором  $\text{HNO}_3$  в спирте.

В железном метеорите Odessa присутствуют металлические минералы, такие как: камасит, тэнит и их смесь в виде плессита. Необычной находкой стало округлое включение графита размерами 0.8 на 0.6 мм. На границе металл/углерод был обнаружен минерал когенит  $(\text{Fe}, \text{Ni})_3\text{C}$ . На фотографиях когенита во вторичных электронах наблюдается полосчатая структура (рис. 1а). Эти полосы в структуре не имеют отношения к химическому составу или фазовой ориентации. Ранее аналогичный эффект в когените изучался в работах [Brecher, 1976; Reznik, 2017] и был связан с магнитными доменами, проявляющимися в виде фигур Биттера-Акулова. Такая структура в метеорите Odessa возникает в результате формирования контраста из-за взаимодействия электронов с магнитными доменами, в то время как в оптическом микроскопе контраст на этих доменах не наблюдается.

Стоит отметить, что когенит  $(\text{Fe}, \text{Ni})_3\text{C}$  был также обнаружен в метеорите Уакит (IIAB). Трещины, заполненные продуктами земного выветривания, проходят вдоль крупных включений карбида. Отдельные

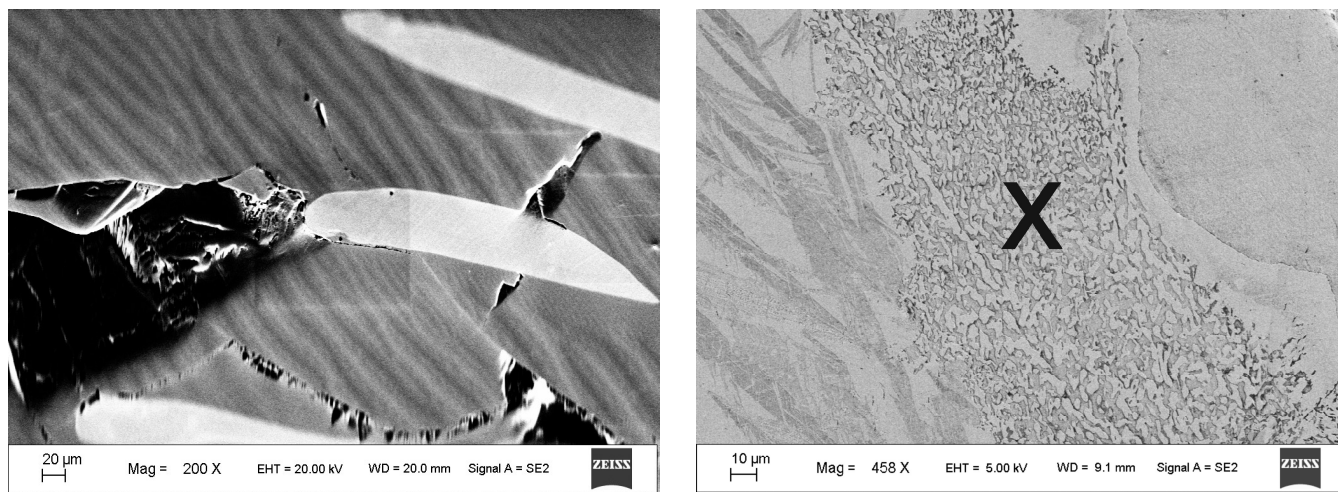


Рис. 1. Электронные микрофотографии карбидов железа в метеоритах а) полосчатая структура когенита  $(\text{Fe, Ni})_3\text{C}$  в железном метеорите Odessa и б) хаксонит –  $\text{X } (\text{Fe, Ni})_{23}\text{C}_6$  в хондрите Челябинск

включения когенита в метеорите содержат минералы, которые требуют дополнительного изучения.

Исследуемый фрагмент метеорита Челябинск характеризуется большим количеством металлических зерен с зональным тэнитом, что свидетельствует о медленном охлаждении светлой литологии. В данном фрагменте удалось обнаружить уникальную металлическую частицу размером 350 на 1000 мкм, содержащую камасит, зональный тэнит и редкий для метеоритов карбид железа  $(\text{Fe, Ni})_{23}\text{C}_6$  (рис. 1, б). Вблизи границы камасит/тэнит располагается участок с двухфазной областью размером порядка 100 мкм, который состоит из светлых частиц в темной матрице. Данные EDS выявили различное содержание Ni и Fe в этих фазах. В темной матрице содержится 87 вес. % Fe и 5 вес. % Ni, в светлых частицах – 43 вес. % Fe и 53 вес. % Ni. Идентификация этих фаз производилась с помощью метода дифракции обратно отраженных электронов (EBSD). Дифракционные картины Кикучи показали, что светлые высоконикелевые частицы имеют решетку  $\gamma\text{-Fe}(\text{Ni})$ , а темная матрица – решетку карбида хрома  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ , близкую по своим параметрам к решетке карбида железа  $(\text{Fe, Ni})_{23}\text{C}_6$  [Scott, 1971].

Как отмечается в работе [Scott, 2012], графит и карбиды в метеоритах выделяются после завершения кристаллизации при распаде твердых растворов. Максимальная растворимость углерода в  $\alpha\text{-Fe}(\text{Ni})$  меньше, чем в  $\gamma\text{-Fe}(\text{Ni})$ , более чем в 10 раз, и растворимость углерода в обеих фазах снижается с уменьшением температуры. Карбиды формируются при низких температурах после камасита и фосфидов  $(\text{Fe, Ni})_3\text{P}$ , по-видимому, одними из последних фаз. Более предпочтительным для зарождения является когенит  $\text{Fe}_3\text{C}$ , однако, иногда в железных метеоритах встречаются оба карбида ( $\text{Fe}_3\text{C}$  и  $\text{Fe}_{23}\text{C}_6$ ). В исследуемых образцах карбиды были обнаружены по отдельности: когенит в Odessa и хаксонит в Челябинске.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00598, а также при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Проекты 5.4825.2017/6.7, 5.3451.2017/4.6).*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Brecher A., Cutrera M., J. Scanning Electron-Microscope (SEM) Study of Magnetic Domain-Structure of Iron-Meteorites and their Synthetic Analogs // Journal of Geomagnetism and Geoelectricity. 1976. V 28. P. 31-45.
2. Buchwald V.F. Handbook of Iron Meteorites: Their History, Distribution, Composition and Structure. California Press, 1975. 1426 p.
3. Handbook of Mineralogy. Mineral Data Publishing, version 1, 2001-2005. <http://www.handbookofmineralogy.org/pdfs/cohenite.pdf> 27.02.2019
4. Handbook of Mineralogy. Mineral Data Publishing, version 1, 2001-2005. <http://www.handbookofmineralogy.org/pdfs/haxonite.pdf>, 27.02.2019
5. <https://www.mindat.org> 28.02.2019
6. Harries D. and Langenhorst F. Haxonite from 25143 Itokawa and its implications for metamorphic parent body fluids // Meteoritics & Planetary Science 2014. V. 49. P. 5136.
7. Reznik B., Kontny A., Uehara M., Gattacceca J., Solheid P., Jackson M. Magnetic domains and magnetic stability of cohenite from the Morasko iron meteorite // Magnetism and Magnetic Materials. 2017. V426. P. 594-609.
8. Scott E. R. D. New carbide,  $(\text{Fe, Ni})_{23}\text{C}_6$ , found in Iron Meteorites // Nature Physical science. 1971. V229. P. 61-62.
9. Scott E. R. D., Goldstein J. I. Occurrence of carbides and graphite in Iron Meteorites and origin of C-rich Irons // 43rd Lunar & Planetary Science Conference. 2012. P. 2671.